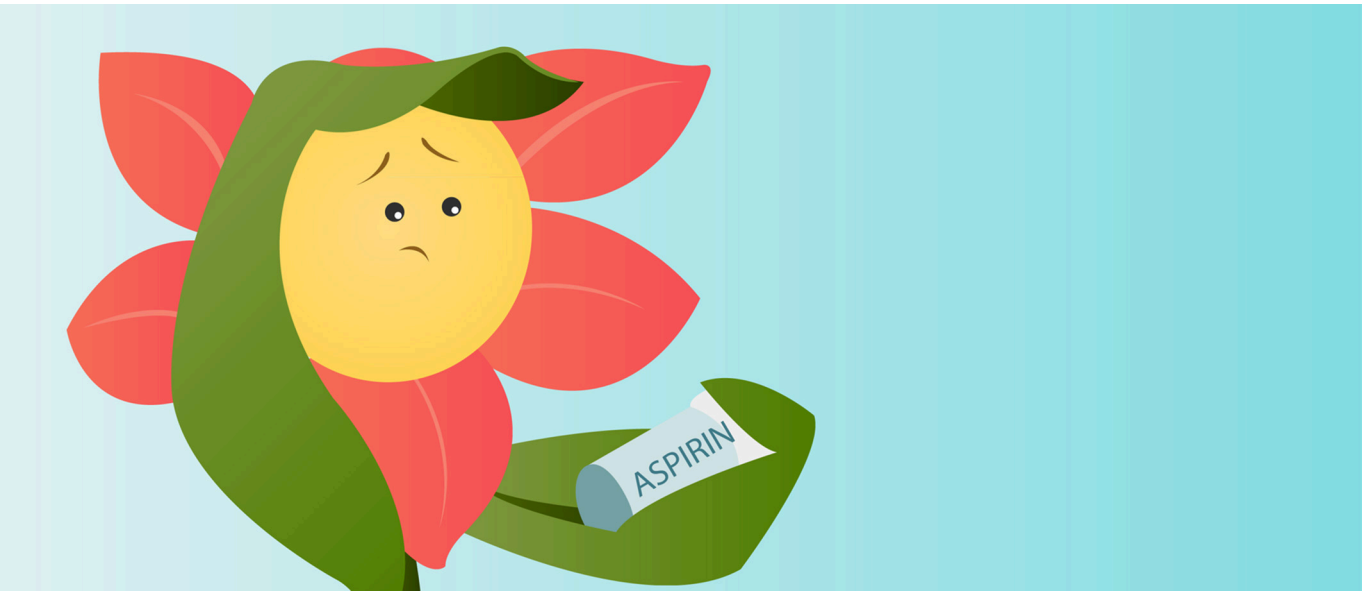
الصحة
نُشر على الإنترنت بتاريخ: 10 ديسمبر 2021
doi: 10.3389/frym.2017.00014-ar

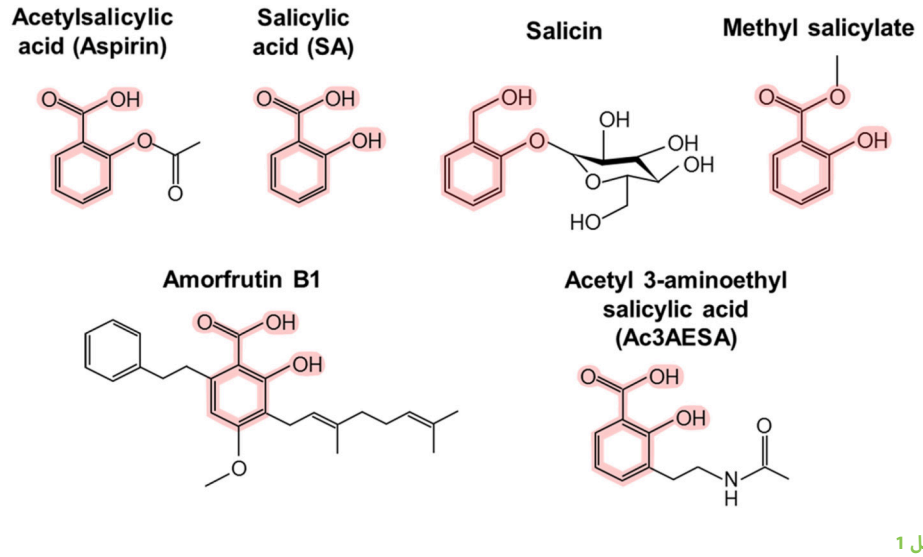


كيف يعمل الأسبرين في النباتات والبشر؟

Daniel F. Klessig *
Boyce Thompson Institute, Cornell University, Ithaca, NY, USA

يعتمد الملايين من البشر على الأسبرين لمعالجة الصداع والأنواع المختلفة من الحمى وغيرها من الأمراض. ولكن الكثير من الناس لا يعلمون أن العنصر النشط في الأسبرين قد اكتُشف للمرة الأولى في النباتات. ففي البشر، يُحول جسم الإنسان الأسبرين إلى مادة تدعى حمض الساليسيليك (SA). إذ تصنع النباتات حمض الساليسيليك، وتستخدم النباتات هذه المادة للمساعدة في الدفاع عن نفسها ضد العدوى. ولاكتشاف كيفية عمل حمض الساليسيليك في النباتات، نستخدم طرقًا قوية للتعرف على أكثر من 24 بروتينًا من البروتينات المرتبطة بحمض الساليسيليك. ويؤدي ارتباط حمض الساليسيليك بهذه البروتينات إلى حدوث تغييرات على أنشطتها. كما يرتبط حمض الساليسيليك والمركبات ذات الصلة أيضًا بالعديد من البروتينات في البشر. وقد اكتشفنا العديد من البروتينات البشرية الجديدة التي بمقدورها الارتباط بهذا الحمض. وترتبط هذه البروتينات بأمراض شائعة ومدمرة تصيب البشر. وبالإضافة إلى ذلك، تعرفنا على نسخ جديدة متعددة من هذا الحمض ترتبط بهذه البروتينات على نحو أكثر قوة مقارنة بحمض الساليسيليك. ونتيجة لذلك، تكبح هذه النسخ من حمض الساليسيليك الأنشطة المرتبطة بالأمراض والناجمة عن هذه البروتينات على نحو أفضل من حمض الساليسيليك نفسه. وهو ما يعطينا الأمل في تصنيع منتجات تشبه الأسبرين ولكنها أفضل منه من حيث الفاعلية.

المراجعون الصغار:
ITI GALILEO FERRARIS
العمر:14-15



شكل 1

التركيبات الكيميائية لحمض الساليسيليك ومشتقاته الطبيعية والصناعية. ويتكون الجزء الرئيسي من مركب حمض الساليسيليك من حلقة من الفينيل مكونة من ست ذرات من الكربون (C) في موقع واحد وترتبط جميعها ببعضها البعض برابطة فردية أو ثنائية. وترتبط مجموعة الكربوكسيل (COOH) بذرة الكربون في الموقع 1. وترتبط مجموعة الكربوكسيل (COOH) بذرة الكربون في الموقع 2. هذا هو التركيب الرئيسي لحمض الساليسيليك. وهو مظلل باللون الوردي. وتحتوي جميع المركبات الأخرى ذات الصلة بهذا الحمض على نفس هذا التركيب الرئيسي بالإضافة إلى المزيد من "الإضافات" الكيميائية. فعلى سبيل المثال، يحتوي حمض الأسيتيل ساليسيليك أو الأسبرين على مجموعة الأسيتيل (CH_3CO) مضافة إلى مجموعة الهيدروكسيل في الموقع 2. ويؤثر وجود هذه "الإضافات" المختلفة على كيفية ارتباط البروتينات بها بإحكام، ومن ثم كيف يمكنها تغيير نشاط بروتينات معينة بطريقة جيدة أو على نحو فعال. فعلى سبيل المثال، تمكن الإضافات في الموقع 3 في "الأمورفروتين (amorfrutin B1) وفي "أسيتيل 3-أمينوإيثيل حمض الساليسيليك" (acetyl 3-aminoethyl SA) الهدفين اللذين تم تحديدهما مؤخرًا في البشر – وهما بروتينا GAPDH و HMGB1 - من الارتباط على نحو أكثر شدة بالمركبات ذات الصلة بحمض الساليسيليك.

ما هو الأسبرين؟

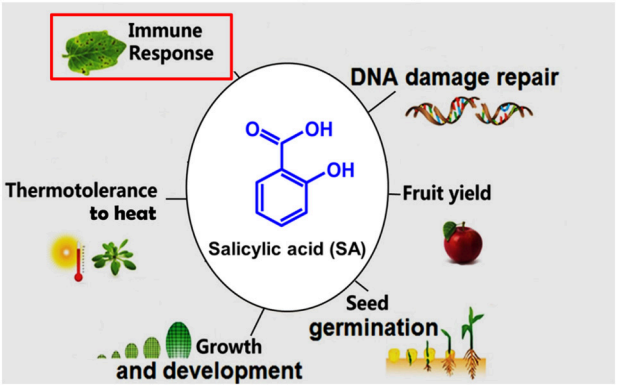
هو الدواء الأكثر استخدامًا في العالم. يتم إنتاج ما قيمته 80 مليون جنيه إسترليني من الأسبرين، في حين يُستهلك 100 مليار قرص منه كل عام. يخفف الأسبرين من الألم والحمى و**الالتهاب**. كما أنه يقلل من خطر الإصابة بالأزمات القلبية والسكتات الدماغية وأنواع معينة من السرطان. وبعد مرور ما يزيد على قرن من الزمان من استخدام البشر له، لا يزال العلماء يكتشفون كيف يؤثر الأسبرين على الجسم.

ولآلاف السنين، استخدم الناس من ثقافات مختلفة النباتات التي تحوي مركبات تشبه الأسبرين. فعلى سبيل المثال، استخدم الطبيب اليوناني أبقراط Hippocrates لحاء الصفصاف لمعالجة الحمى والألم، وذلك قبل 2500 عام. كما زرع الناس في أوروبا على مدار قرون من الزمان إكليلية المروج لمعالجة الألم والحمى. ويحتوي كل من الصفصاف وإكليلية المروج على مركبات تشبه الأسبرين تسمى سالسين وساليسيلات الميثيل، على التوالي. ويتحول كل من الأسبرين والسالسين وساليسيلات الميثيل جميعها بسرعة إلى مادة تعرف بحمض الساليسيليك (يشار إليها اختصارًا بـ SA) داخل الجسم البشري.

وبحلول القرن التاسع عشر، عرف العلماء أن حمض الساليسيليك هو المركب المشتق من النبات والذي يسكن الألم ويخفف الحمى. ومع ذلك، فإن استخدام هذا الحمض لفترات طويلة يسبب مشكلات في المعدة لدى بعض الناس. وفي عام 1897، أدخل أحد الكيميائيين يدعى Bayer تعديلًا كيميائيًا يعرف باسم مجموعة الأسيتيل (CH_3CO) على حمض الساليسيليك، حيث تمكن من تحويله إلى حمض الأسيتيل ساليسيليك. وقد سمى Bayer هذه المادة الجديدة الأسبرين. ويسبب الأسبرين مشكلات أقل في المعدة مقارنة بغيره من الأدوية. ويبين الشكل 1 التركيب الكيميائي للأسبرين، وحمض الساليسيليك، وغيره من المواد الشبيهة.

الالتهاب
(INFLAMMATION)

هو جزء من الاستجابة البيولوجية المعقدة لأنسجة الجسم تجاه المحفزات الضارة، مثل مسببات الأمراض والخلايا التالفة، أو مسببات الالتهاب والتهيج. وهي استجابة وقائية تشمل الخلايا المناعية.



شكل 2

بعض الأدوار التي يلعبها حمض الساليسيليك في النبات.

ما هو حمض الساليسيليك وما وظائفه في النباتات؟

تنتج جميع النباتات حمض الساليسيليك. ويعمل هذا الحمض كهرمون مهم في النبات. والهرومونات هي مركبات تتحكم في العمليات الحيوية. يظهر الشكل 2 عددًا من العمليات التي يؤثر عليها حمض الساليسيليك في النبات. والأكثر أهمية أن حمض الساليسيليك يتحكم في الاستجابات المناعية للنبات ضد العدوى.

تؤثر معظم **الهرمونات** على العمليات الحيوية في النبات والحيوان من خلال ارتباطها بأحد البروتينات، التي تعرف باسم المستقبلات، أو بعدد صغير منها. ومن المثير للدهشة، بدا أن حمض الساليسيليك يُظهر سلوكًا مختلفًا. وقد استخدمنا طرقًا مختبرية جديدة لفحص الجزء الأكبر من الـ 20 ألف بروتين الموجود في الخلية النباتية، حيث اكتشفنا عشرات البروتينات التي تلتصق بحمض الساليسيليك. ويتغير نشاط هذه البروتينات جراء الارتباط بحمض الساليسيليك [1]. نُطلق على البروتينات التي تلتصق بحمض الساليسيليك اسم البروتينات المرتبطة بحمض الساليسيليك (SABPs) أو أهداف حمض الساليسيليك.

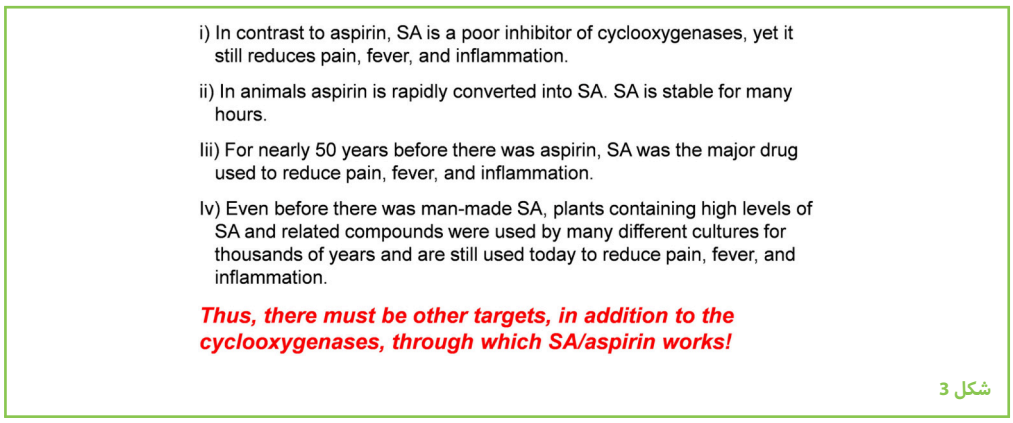
الهرمونات (HORMONES)

مواد تنتجها الكائنات الحية وتنقلها عبر سوائل الأنسجة مثل الدم في الحيوان أو العصارة في النبات لتحفيز خلايا أو أنسجة معينة على فعل شيء ما.

وتعرف القوة أو الشدة التي ترتبط بها هذه البروتينات بحمض الساليسيليك باسم الميل للارتباط (أو الألفة). ولبعض هذه البروتينات ميل شديد للارتباط بحمض الساليسيليك، بمعنى أنها تلتصق به بشدة. وهو ما يعني أنه حتى إذا كانت مستويات حمض الساليسيليك منخفضة، فإن هذه البروتينات ستلتصق به، وهو ما يغير من أنشطتها. وبعض البروتينات الأخرى لها ميل أقل تجاه حمض الساليسيليك. ونتيجة لذلك، فإنها لا ترتبط به وتغير نشاطها إلا عندما ترتفع مستوياته. والأهم من ذلك هو أن مستويات حمض الساليسيليك في النبات يمكن أن تتنوع بشدة. ويمكن أن تختلف مستويات حمض الساليسيليك في النبات من موقع لآخر داخل الخلية الواحدة، كما يمكن أن تختلف أيضًا في الأنسجة المختلفة للنبات وفي مراحل النمو والتطور المختلفة للنبات، أو عند استجابة النبات إلى إشارات بيئية مختلفة؛ مثل العدوى. وهو ما يعني أن أنشطة البروتينات المتعددة المرتبطة بحمض الساليسيليك ستتأثر على نحو مختلف، معتمدة في ذلك على موقعها، والمرحلة التطورية للنبات والظروف الخارجية/البيئية. ويعني هذا المزيج من هذه البروتينات (SABPs) إلى جانب مجموعة متنوعة من المواد ذات الألفة للارتباط بحمض الساليسيليك ومستويات الحمض المختلفة داخل النبات أن هناك العديد من الطرق المختلفة التي يمكن لحمض الساليسيليك أن يؤثر بها على النبات.

شكل 3

لماذا يجب أن يكون للأسبرين أهدافًا إلى جانب إنزيمات الأكسدة الحلقية.



شكل 3

لماذا يؤثر حمض الساليسيليك على النبات؟

حسنًا، لماذا يتمتع هرمون نباتي بكل هذا التأثير على الإنسان؟ تتغذى غالبية الحيوانات، بما في ذلك الإنسان، على النباتات. وهو ما يعرضهم لحمض الساليسيليك والمركبات المرتبطة به على أساس منتظم. وبالإضافة إلى ذلك، تفيد بعض الدراسات أن الحيوانات تنتج حمض الساليسيليك الخاص بها من المركبات الموجودة بكميات كبيرة في أنواع معينة من الغذاء. وربما يكون الوجود المتواصل لحمض الساليسيليك في أجسام الحيوانات، الناتج عن الوجبات الغذائية وربما إنتاجها الخاص من حمض الساليسيليك على حد سواء، قد أدى، بمرور الوقت، إلى تطور أهداف عديدة من حمض الساليسيليك في الحيوانات. ولو أكدت الدارسات المستقبلية هذه النظرية، فسيتم حينها تحديد المزيد من أهداف حمض الساليسيليك الموجودة في كل من النبات والحيوان. من شأن معرفة المزيد عن هذه الأهداف مساعدة العلماء على تحديد الآليات التي يعمل حمض الساليسيليك من خلالها. وينبغي أن تزودنا هذه المعرفة بأدلة لإيجاد استراتيجيات ذات مستويات نجاح عالية للتحكم في الأمراض في النبات والحيوان.

إنزيمات الأكسدة الحلقية (CYCLOOXYGENASES)

هي البروتينات التي تصنع البروستاجلاندين.

كيف يعمل الأسبرين في البشر؟

في ثمانينيات القرن الماضي، اعتقد الأطباء أنهم قد اكتشفوا آلية عمل الأسبرين. بيد أن ما اكتشفوه كان جزءًا صغيرًا فقط مما يفعله حمض الساليسيليك وآلية عمله. وفي مطلع الثمانينيات، اكتشف العالم الإنجليزي John Vane ومساعدوه أن الأسبرين يوقف نشاط بروتينات معينة تعرف باسم **إنزيمات الأكسدة الحلقية**، وهي إنزيمات تصنع مواد تعرف باسم **البروستاجلاندين.** والبروستاجلاندين عبارة عن مركبات تشبه الهرمونات ويمكن أن تسبب الألم والحمى والالتهابات. وقد ساعد هذا الاكتشاف المهم Vane على الفوز بجائزة نوبل في عام 1982. ومنذ هذا الاكتشاف، اعتقد غالبية العلماء والأطباء أن الأسبرين يعمل على إيقاف نشاط إنزيمات الأكسدة الحلقية.

البروستاجلاندين (PROSTAGLANDINS)

هي مواد تشبه الهرمونات وتشارك في سلسلة عريضة من وظائف الجسم، مثل معالجة الالتهابات.

ولكن هذه الفكرة حول أن الوظيفة الوحيدة للأسبرين في الإنسان/الحيوان هي إيقاف هذه الإنزيمات بعينها تتجاهل أربع حقائق مهمة (الشكل 3). أولًا، على الرغم من أن حمض الساليسيليك ليس جيدًا جدًا بما يكفي في وقف هذه الإنزيمات، فإن للأسبرين وحمض الساليسيليك نفس التأثيرات تقريبًا على أعراض البشر/الحيوانات الذين يتلقونه - وهذه هي النقطة الأكثر أهمية. ثانيًا، يتحول الأسبرين داخل جسم الإنسان خلال دقائق إلى حمض الساليسيليك، والذي يظل مستقرًا لعدة ساعات. ثالثًا، قبل اكتشاف الأسبرين بفترة طويلة كان حمض الساليسيليك هو العقار

الرئيسي المستخدم في تقليل الألم والحمى والالتهابات. رابعًا، وحتى قبل وجود حمض الساليسيليك المصنع، كانت النباتات التي تحوي مستويات عالية من حمض الساليسيليك والمركبات ذات الصلة تستخدم لآلاف السنين في العديد من الحضارات لتسكين الألم وتخفيف الحمى والالتهابات، ولا زالت تستخدم حتى يومنا هذا. ومن ثم، فبالإضافة إلى إنزيمات الأكسدة الحلقية، يجب أن تكون هناك أهداف أخرى يستطيع حمض الساليسيليك والأسبرين من خلالها إحداث العديد من التأثيرات الإيجابية.

ما التأثيرات الأخرى للأسبرين أو حمض الساليسيليك؟

للعثور على أهداف أخرى لحمض الساليسيليك/الأسبرين في الإنسان، استخدمنا نفس الطرق التي سبق وأن استخدمناها للبحث عن أهداف الحمض في النبات. وقد اكتشفنا العديد من الأهداف الجديدة. والأهم من ذلك أن هذه الأهداف ترتبط ببعض الأمراض الأكثر شيوعًا وفتكًا بالإنسان. وتشمل هذه الأهداف مركب ``جليسرألدهيد 3-فوسفات ديهيدروجينيز'' (GAPDH)، وهو بروتين بالغ الأهمية تحتاجه الخلايا لإنتاج الطاقة [2]. تستخدم بعض الفيروسات التي تصيب النبات والحيوان، بما في ذلك الفيروسات التي تسبب مرض التقزم (وقف النمو) في نبات الطماطم وتلك التي تسبب مرضًا كبديًا في البشر يعرف بالالتهاب الكبدي، بروتين GAPDH للتكاثر داخل الخلية المضيفة. وقد بينا في تجاربنا أن بروتين GAPDH في النبات يرتبط بحمض الساليسيليك، وأن هذا الارتباط يمنع نمو الفيروس المعروف باسم ``فيروس التقزم الشجيري في الطماطم'' [3]. كما نعتقد أيضًا أن حمض الساليسيليك سوف يمنع تكاثر الفيروس المسؤول عن مرض الالتهاب الكبدي. كما تحوم الشبهات حول بروتين GAPDH في كونه المسؤول عن العديد من أمراض المخ مثل مرض هنتنغتون وباركنسون (الشلل الرعاش) وألزهايمر. وقد وجدنا أن بروتين GAPDH البشري يرتبط أيضًا بحمض الساليسيليك، وأن هذا الارتباط يساعد في منع خلايا المخ من الموت [2].

وقد كشف بحثنا بشأن أهداف حمض الساليسيليك أيضًا عن بروتين آخر يعرف باسم ``high mobility group box 1'' (HMGB1) ويوجد هذا البروتين بمعدلات عالية في أنوية الخلايا، وهي موضع وجود الحمض النووي (المادة الوراثية). يساعد HMGB1 في ترتيب الحمض النووي داخل النواة. وعند تسرب HMGB1 إلى خارج الخلية بسبب تلف الأنسجة، فإنه يُنشّط الجهاز المناعي في الحيوان، حيث يحشد هذا البروتين الخلايا المناعية ويوجهها نحو النسيج التالف. كما يحفز HMGB1 أيضًا الخلايا المناعية على إنتاج البروتينات التي تحفز الالتهاب، حيث يحمي الالتهاب الناتج النسيج التالف من العدوى. ومع ذلك، فلا يمكن للجسم في بعض الأحيان التحكم في الالتهاب على وجه مناسب. وهو ما يمكن أن يؤدي إلى تطور العديد من الأمراض المرتبطة بالالتهاب مثل أمراض القلب والتهاب المفاصل والتهاب الأمعاء وبعض أنواع من السرطان. وقد وجدنا أن بروتين HMGB1 يرتبط بحمض الساليسيليك، وأن هذا الارتباط يوقف الأنشطة الالتهابية لهذا البروتين [4].

وتحتوي جميع الخلايا التي بها أنوية، بما في ذلك خلايا النبات، على بروتينات ذات صلة بـHMGB1. وقد وجدنا أن HMGB3 في النبات يُنشّط الاستجابات المناعية فيه عند إطلاقه من الخلايا. وعلى غرار HMGB1 البشري، يرتبط HMGB3 بحمض الساليسيليك، وهو الارتباط الذي يوقف قدرة HMGB3 على تنشيط الاستجابات المناعية في النبات [5]. والمثير للاهتمام أن كلًا من بروتيني HMGBs وGAPDH يقومان بأنشطة متشابهة في كل من النبات والإنسان، وهي الأنشطة التي يمنعها حمض الساليسيليك.

الأمل في الحصول على نوع أفضل من الأسبرين!

قادتنا دراساتنا على بروتيني HMBG1 وGAPDH البشريين إلى اكتشاف مركبات صناعية جديدة مصنوعة من حمض الساليسيليك. يرتبط كل من HMBG1 وGAPDH بالمركبات ذات الصلة بحمض الساليسيليك على نحو أكثر قوة من ارتباطها بحمض الساليسيليك ذاته. ونتيجة لذلك، تكون هذه المركبات الجديدة المرتبطة بحمض الساليسيليك أكثر قوة بحوالي 10-100 مرة من حمض الساليسيليك ذاته في تغيير أنشطة كل من HMBG1 وGAPDH. تعرف المركبات الطبيعية ذات الصلة بحمض الساليسيليك بمركبات الأمورفروتين، والتي تصنع من نبات طبي صيني يعرف باسم Glycyrrhiza foetida. ويعرف هذا النبات بشكل شائع باسم العرقسوس.

صمم العلماء مركبًا يعرف باسم ``أسيتيل 3-أمينوإيثيل حمض الساليسيليك'' (acetyl 3-aminoethyl SA) بناءً على تركيب الأمورفروتين. ويحتوي كل من هذين المركبين على ``إضافات'' كيميائية مشابهة ترتبط بهما في ذرة الكربون في الموقع 3 (الشكل 1). يرتبط كل من HMGB1 وGAPDH بالمركبات ذات الصلة بحمض الساليسيليك على نحو أكثر قوة وإحكامًا من حمض الساليسيليك ذاته بسبب هذه الإضافات. ونتيجة لذلك، فإن هذه المركبات الجديدة ذات الصلة بحمض الساليسيليك هي مثبطات أكثر قوة لبروتيني HMGB1 وGAPDH. ويبين الاكتشاف أن تطوير الأدوية ذات الصلة بحمض الساليسيليك والتي تعمل على نحو أفضل من حمض الساليسيليك ذاته ليس أمرًا مستحيلًا!

شكر وتقدير

يشكر المؤلفون الدكتور/ Hyong Woo Choi لمساعدته في إعداد هذه الأشكال. العمل الملخص أعلاه والذي قام به المؤلف ومساعدوه ممول من قبل the US National Science Foundation grant numbers MCB-9310371، MCB-9904660، IBN-0110272، IBN-0241531، DBI-0500550، IOS-052360 وIOS-0820405.

مقال المصدر الأصلي

Klessig, D. F., Tian, M., and Choi, H. W. 2016. Multiple targets of salicylic acid and its derivatives in plants and animals. *Front. Immunol.* 7:1–10. doi: 10.3389/fimmu.2016.00206

المراجع

1. Manohar, M., Tian, M., Moreau, M., Park, S. W., Choi, H. W., Fei, Z., et al. 2015. Identification of multiple salicylic acid-binding proteins using two high throughput screens. *Front. Plant Sci.* 5:777. doi: 10.3389/fpls.2014.00777
2. Choi, H. W., Tian, M., Manohar, M., Harraz, M. M., Park, S. W., Schroeder, F. C., et al. 2015. Human GAPDH is a target of aspirin's primary metabolite salicylic acid and its derivatives. *PLoS ONE*. doi: 10.1371/journal.pone.0143447
3. Tian, M., Sasvari, Z., Gonzalez, P. A., Friso, G., Rowland, E., Liu, X., et al. 2015. Salicylic acid inhibits the replication of tomato bushy stunt virus by directly

targeting a host component in the replication complex. *Mol. Plant Microbe Interact.* 28:379– 86. doi: 10.1094/MPMI-09-14-0259-R

4. Choi, H. W., Tian, M., Song, F., Venereau, E., Preti, A., Park, S. W., et al. 2015. Aspirin's active metabolite salicylic acid targets human high mobility group box 1 to modulate inflammatory responses. *Mol. Med.* 21:526–35. doi: 10.2119/molmed.2015.00148
5. Choi, H. W., Manohar, M., Manosalva, P., Tian, M., Moreau, M., and Klessig, D. F. 2016. Activation of plant innate immunity by extracellular high mobility group box 3 and its inhibition by salicylic acid. *PLoS Pathog.* 12:e1005518. doi: 10.1371/journal.ppat.1005518

نُشر على الإنترنت بتاريخ: 10 ديسمبر 2021

حرره: Pasquale Maffia, University of Glasgow, UK

الاقتباس: Klessig DF (2021) كيف يعمل الأسبرين في النباتات والبشر؟
Front. Young Minds doi: 10.3389/frym.2017.00014-ar

مُترجَم ومقتبس من: Klessig DF (2017) How Does Aspirin Work in Plants and Humans? Front. Young Minds 5:14. doi: 10.3389/frym.2017.00014

إقرار تضارب المصالح: يعلن المؤلفون أن البحث قد أُجري في غياب أي علاقات تجارية أو مالية يمكن تفسيرها على أنها تضارب محتمل في المصالح.

COPYRIGHT © 2017 © 2021 Klessig. هذا مقال مفتوح الوصول يتم توزيعه بموجب شروط ترخيص المشاركة الإبداعية Creative Commons Attribution License (CC BY). يُسمح بالاستخدام أو التوزيع أو الاستنساخ في منتديات أخرى، شريطة أن يكون المؤلف (المؤلفون) الأصلي أو مالك (مالكو) حقوق النشر مقيدًا وأن يتم الرجوع إلى المنشور الأصلي في هذه المجلة وفقًا للممارسات الأكاديمية المقبولة. لا يُسمح بأي استخدام أو توزيع أو إعادة إنتاج لا يتوافق مع هذه الشروط.

المراجعون الصغار

ITI GALILEO FERRARIS، العمر: **14-15**

نحن طلاب في الفرقة الثانية بمدرسة ثانوية في نابولي، إيطاليا. تهتم مدرستنا كثيرًا بالمواد الفنية والعلمية التي تلعب فيها اللغة الإنجليزية دورًا واضحًا.

المؤلف

DAN KLESSIG

تدرب Dan Klessig على يد James Watson في Harvard - الحاصل على جائزة نوبل. مثلت أبحاثه الأولى حول الفيروسات الغدانية التي تصيب البشر، والتي قدمت عددًا من الأدلة حول انقسام الجينات واتحاد الحمض النووي الريبي، علامة بارزة في مسار الاكتشافات والابتكار. وقد وسع Klessig من نطاق أبحاثه في مطلع تسعينيات القرن الماضي لتشمل علم أمراض النبات. وتُقدم أبحاثه التي استمرت على مدار 40 عامًا، نشر خلالها 240 بحثًا حول أمراض الإنسان والنبات، منظورًا بحثيًا استثنائيًا، وهو ما مكنه من سد الفجوة بين هذين المجالين والتوصل إلى رؤى غير عادية في خصائص علم الأحياء والكيمياء الحيوية التي يتشارك فيها الإنسان مع النبات. dfk8@cornell.edu*

النسخة العربية مقدمة من
Arabic version provided by

جامعة الملك عبدالله للعلوم والتقنية
King Abdullah University of Science and Technology